引用格式：秦大河, 效存德, 丁明虎, 等. 服务冬奥、支撑发展：冰冻圈科学的延拓. 中国科学院院刊, 2022, 37(3): 395-402.
Qin D H, Xiao C D, Ding M H, et al. Serving Beijing 2022 Olympic Winter Games and developing ice and snow industry: Application and extension of cryospheric science. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(3): 395-402. (in Chinese)

服务冬奥、支撑发展：冰冻圈科学的延拓

秦大河[1]　效存德[1,2*]　丁明虎[3]　王飞腾[1]　朱志强[4]　殷水清[2]　任贾文[1]

1 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室 兰州 730000
2 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室 北京 100875
3 中国气象科学研究院全球变化与极地研究所 北京 100081
4 哈尔滨体育学院 哈尔滨 150006

摘要 冰冻圈科学作为一门自然和人文深度交叉的新兴学科，其目的是认识自然规律，服务人类社会，促进可持续发展。近年来，中国冰冻圈研究实现了从传统基础研究到服务国家重大需求的跨越，这标志着学科的日臻成熟。北京冬奥会是我国重要历史节点的重大标志性活动。早在2016年冬奥会申办成功之初，当意识到国际顶级赛事对雪冰特殊需求“近在眼前”后，冰冻圈科学国家重点实验室即以国家自然科学基金创新研究群体项目（三期）和中国科学院学部院士咨询项目为依托，率先在河北张家口滑雪场开展了观测研究。过去5年来，冬奥雪务需求牵引着我国冰冻圈科学团队在雪冰物理关键技术环节上集中攻关，推动了学科向应用领域的延拓，取得了预期成果。文章总结研究团队研发的冬奥雪务保障关键技术，展望我国冰雪产业发展路径，从战略思维、科学积淀及实践创新的角度阐述冰冻圈科学的应用及拓展，提出了相关思考和建议。

关键词 冰冻圈科学，北京冬奥会，雪务保障，冰雪产业，冰冻圈服务

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20220303001

冰冻圈科学是以冰川（冰盖）、冻土、积雪、河冰、湖冰等陆地冰冻圈要素，海冰、冰架、冰山等海洋冰冻圈要素，以及雪、霰、雹等大气冰冻圈要素为研究对象，以冰冻圈要素的形成和演化规律为基础，以与其他圈层相互作用为重点，以为社会经济可持续发展服务为目的的科学[1]。冰冻圈科学主要由冰冻圈过程、机理及变化规律，冰冻圈变化的影响机制，以及影响的适应研究等3个层阶组成；这3个层阶从基

*通信作者
资助项目：国家自然科学基金重大项目（41690140），国家自然科学基金创新研究群体项目（41421061），中国科学院学部咨询项目（2017DX003B-003）
修改稿收到日期：2022年3月7日

础研究到应用基础研究再到应用研究，渐次推进。随着对基础研究科学认识的不断深入，不断推动着冰冻圈科学应用的发展。

冰冻圈应用科学发展的一个重要方向是将冰冻圈研究与社会经济发展紧密结合，为解决国家重大需求和区域可持续发展服务[2]。我国冰雪资源丰富，发展冰雪体育和冰雪旅游产业具有广阔前景。北京冬奥会的成功申办，激发了公众冬季体育热情，为我国冰雪产业发展起到了有力的助推作用。近年来，全国新建雪场每年以几十个的数量递增，各地冰雪资源得以迅速开发，冰雪运动、冰雪旅游得以快速普及。然而，我国冰雪产业起步较晚，现有的冰雪科研队伍尚未涉足这一领域，科研力量薄弱。因此，新时期我国的冰雪产业既面临着难得的发展机遇，又面临着各类挑战。

1 冰川学长期积累奠定了应用研究基础

“以任务带学科”是新中国成立初期较为普遍的科学研究之路，中国冰冻圈科学也不例外。在施雅风领导下，20 世纪 50 年代末中国科学院冰雪利用研究队率先以冰川学、冻土学引入，初衷旨在满足国家社会经济发展建设的需求，主要是解决祁连山冰雪融水资源的开发利用及青藏公路建设中所涉及的冻土问题；并于 1965 年成立了中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所（1978 年分为中国科学院兰州冰川冻土研究所和中国科学院兰州沙漠研究所，现均已并入中国科学院西北生态环境资源研究院）[3]。1966—1976 年很多研究一度受干扰而被迫停顿，但冰川学研究在极困难的情况下坚持前进，应用冰川学得到了一定的发展。这个时期，中国科学院冰川冻土研究所开辟了天山西段公路雪崩和风吹雪的实验研究，提出了防治工程设计[4]，还开始黄河河冰观测和力学性质实验研究。20 世纪 80 年代初，中国科学院兰州冰川冻土研究所成立了冰雪物理应用研究室，专门开展积雪、冰川及其他冰体物理和应用基础研究，从而使我国的雪冰物理研究在冰结构和雪的成冰过程、雪冰热学、冰力学和冰川动力学等方面取得了一定的进展。但后来随着我国基础研究出现“向 SCI 论文看齐”的导向，传统冰雪物理应用研究队伍逐渐失散，研究出现青黄不接的局面。

21 世纪以来，中国冰冻圈研究内容不断深入，科学认知水平大幅提高，同时在冰冻圈组成要素形成演化、冰冻圈变化的过程与机理研究，以及基于单点和流域尺度的观测试验及理论等取得重要进展，中国的冰冻圈科学研究实现了与国际接轨，研究工作进入了平稳、快速的发展阶段。中国学者在冰冻圈变化[5,6]、冰冻圈变化的影响、冰冻圈影响的适应对策[7]等方面开展了一系列研究，取得了系统性成果，基本完成了从基础研究到应用研究的贯通，从而使冰冻圈科学迈向体系化的新高度。

经过长期的学术积累，中国科学家提出冰冻圈科学的概念和理论框架，初步形成了冰冻圈科学体系，率先在国际上建立了以“冰冻圈科学”命名的科研机构——冰冻圈科学国家重点实验室。该实验室将冰冻圈过程与机理、冰冻圈与其他圈层相互作用和冰冻圈变化影响的适应对策确定为主体研究脉络，以期为社会经济可持续发展服务[1]；“冰冻圈科学研究集体”荣获 2021 年度中国科学院杰出科技成就奖。同时，瞄准未来需求，冰冻圈科学国家重点实验室加强青年人才培养，编纂了《英汉冰冻圈科学词汇》《冰冻圈科学辞典》等工具书，撰写了以《冰冻圈科学概论》（中、英文）为主体，15 册本冰冻圈科学分论为辅助的教材体系，并获得首届全国优秀教材（高等教育类）特等奖；在中国科学院大学等全国 8 所大学开设冰冻圈科学普及课程及研究生课程，培养了一大批中青年人才，形成了以冰冻圈科学国家重点实验室为学科发展策源地和思想中心，以中国科学院青藏高原研究所、清华大学、北京大学、北京师范大学、中国气

象科学研究院、中国极地研究中心等科研院所/高校研究团队为分支的全国人才布局，这标志着冰冻圈科学的发展已经进入了新时代。

2 冬奥雪务：学科应用研究新机遇

北京冬奥会申办成功之初，全国数百个滑雪场没有一条雪道符合国际雪联的高山雪道标准。针对冬奥会赛事用雪保障的关键技术和冰雪经济发展的国家需求，中国科学院、国家自然科学基金委员会、科学技术部等部门，先后启动了中国科学院学部咨询项目和重点部署项目、国家自然科学基金创新研究集体项目（三期）和重大研究计划项目、国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项等。在这些项目的支持下，冰冻圈科学国家重点实验室联合北京师范大学、中国气象科学研究院、哈尔滨体育学院、山东师范大学、河北省气象局、中国科学院南京天文光学技术研究所等科研和业务机构，以及雪邦雪业、亚布力训练基地、国家高山滑雪中心、云顶滑雪公园等国内冰雪产业一流企业，组建了一支由院士指导、中年科学家带队、青年骨干攻关、研究生和产业人员参与的研究团队；研究团队攻克了包括造雪、雪道制作、雪质预测和储雪在内的多个技术难题，研究了气候变化对中国滑雪旅游的影响、冰雪旅游如何助力山区经济可持续发展。

在开展研究的过程中，通过给年轻人压担子，使得一批青年优秀人才脱颖而出。例如，丁明虎、王飞腾、王世金等，目前已经成为科研骨干。同时，也培养了我国第一批雪务保障方向的研究生、滑雪场技术工程师，为“后冬奥时代”我国冰雪产业发展按下“快进键”。这些科研工作，为冰冻圈科学服务国家需求提供了成功经验，也是学科链条延伸的典型案例。

北京冬奥会“带动三亿人参与冰雪运动”，切实将“冷资源”变成了“热经济”。2021 年 7 月 18 日，国务院印发了《全民健身计划（2021—2025 年）》，强调要持续开展群众冬季运动推广普及。在“后冬奥时代”，要让冰雪运动的红利持续释放。冰冻圈科学工作者通过部署新领域人才，组建科研院所+企业相结合的科技创新团队，为保障北京冬奥会顺利举办和推动中国冰雪产业可持续发展提供了智力支持。

针对北京冬奥会雪务保障关键技术和我国冰雪产业的可持续发展战略所开展的大量探索性研究，总结主要进展如下。

2.1 北京冬奥会雪务保障关键技术

（1）*雪场赛道雪质的预报。*滑雪场气象条件和赛道雪质是决定比赛成绩的重要影响因素，是国际雪联及运动员判断比赛舒适度和能否进行比赛的关键要素[8]。雪质演变受到局地气象条件的影响显著，局地气象场的预报精度决定了雪质预报的精度；而且北京冬奥会张家口赛区雪场山地地形复杂，增加了使用降尺度技术的难度。研究团队结合动力与统计降尺度方法的优点，提高局地气象场的预报精度；同时，基于气象要素变化影响雪质演变的机理，发展雪质演变物理模型和人工神经网络模型；此外，利用积雪观测资料，系统地研究和分析北京-张家口地区积雪的时空分布，揭示在全球变暖背景下该地区积雪的变化特征和发展趋势，为 2022 年北京冬奥会提供科学的参考[9]。*该项研究的关键突破点包括：*① 以雪厚度、硬度、密度、表面温度、粒径、含水量为主要指标，建立赛道雪质指标的量化标准和等级判别模型；② 针对张家口崇礼区冬奥雪场的复杂山地地形，研发动力与统计相结合的气象场降尺度技术；发展高精度气象-雪质演变模型；③ 将雪质监测、预报和判定 3 个模块进行集成，形成雪质监测-预报-判定系统，进行雪场天气变化风险评估与赛道雪质预警。

（2）*不同气候条件和制作流程对冰状雪赛道雪质的综合影响。*冰状雪是雪冰体育界约定俗成的一个通俗性称谓，冰川学术语是粒雪冰，其密度介

于 0.45 g/cm^3—0.83 g/cm^3。北京冬奥会之前，国内滑雪场冰状雪赛道的制作经验较少，大型赛事（包括冬奥会项目）的冰状雪赛道都聘请国外团队制作和维护冰状雪赛道，其技术对外保密。研究团队通过系统研究，并在黑龙江亚布力滑雪场、河北云顶滑雪公园和北京国家高山滑雪中心开展了大量的现场试验，突破国外对冰状雪赛道制作关键参数的技术封锁，研发了适合中国不同气候条件并满足国际大型赛事技术标准的高山冰状雪赛道制作关键技术并形成标准，为国内举办大型雪上项目和冰雪产业发展提供科学支撑。该项技术的关键突破点包括：① 确立冰状雪赛道的雪冰物理特性参数指标，形成以雪冰物理特性参数为基础的高山滑雪冰状雪赛道雪质评定标准；② 确定冰状雪赛道质量的关键影响因素，针对我国不同气候区域研发“属地化”冰状雪制作技术，编制冰状雪赛道制作的技术流程和实施指南；③ 研发了冰状雪赛道质量检测专用仪器的研制，包括硬度测量仪和冰雪粒径测量仪。

（3）储雪堆消融动态过程模拟预报。在北京冬奥会期间，根据冬奥会场馆所处的地形、局地气象条件、比赛项目的雪质要求，针对性地制定了“一场一策”的场馆储雪技术方案。赛时，在首钢大跳台和国家跳台滑雪中心储雪 7 000 m^3，确定了储雪堆设计方案，并能对雪堆体积和内部雪质实时监测，从而为赛事用雪提供应急保障。研究团队利用数值模拟方法分析不同覆盖材料的绝热保温性能表现，评估各种可能的储雪覆盖方案，讨论最佳储雪方案[10,11]。在此基础上，研发了“储雪堆智能设计系统”，实现属地化“量身定制”的储雪堆设计，克服传统设计方案推广性差、无法预判效果等弊端。该项技术的关键突破点包括：① 研发“储雪堆智能设计系统”，实现在不同气候条件、不同隔热材料配置方案，以及不同地形条件下，最佳储雪堆几何形态方案的自动设计；② 建立了雪堆内部雪质监测系统，通过分析雪质监测数据和周边气象数据，对储雪过程中出现的风险进行科学评估，确定风险等级，提出应对方案。

（4）高效能造雪模式集成技术。北京冬奥会之前，国内在广泛应用人工造雪过程中，基本采用国产的低效人工控制操作设备或引进国外的大功率高压力直供和接力的半自动、自动化系统，并且要根据每个雪场的具体条件和需求进行专门的单独设计和施工。因此，具有操作不便、效率低下、运行成本高、投资过大、系统建设对环境破坏和影响较大的不利因素。2022 年北京冬奥会滑雪场地类型复杂，造雪受到多种因素影响[12]。在研究我国适合开展滑雪运动的地理条件的基础上，设计多模式网络造雪系统，满足了不同项目滑雪场地的造雪需求，包括对场地整体进行划分，形成不同区域和多个相关的独立子系统，以适应不同海拔、温度、湿度的变化，提高造雪系统的运行能力和效率。该系统的关键突破点包括：① 研发了高效造雪系统模块优化集成技术，对滑雪场泵站集成模块、造雪水处理集成模块、造雪管线模块和泵站模块进行集成，实现了智能模块集成设计；② 开发了智能网络化控制软件技术，针对高效人工造雪系统特点和智能网络化控制需求，构建基于安卓（Android）平台与本地、混合和移动网络（Web）架构的智能网络化人工造雪系统中泵站控制系统。

2.2 以冰冻圈服务引领冰雪产业可持续发展

“冰天雪地也是金山银山”，冰冻圈服务指人类社会从冰冻圈系统中获得的所有惠益。冰冻圈服务以供给服务、调节服务、文化服务和支持服务等给冰雪地带的人们带来福祉。为此，工作组开展了大量研究。

（1）评估了滑雪产业的自然禀赋和未来风险。① 滑雪产业发展对气候资源和地理条件依赖度极高。基于历史气象观测和地形数据，研究揭示了我国积雪资源的自然禀赋，发现稳定积雪区即东北地区、新疆北部和青藏高原等地的积雪丰度相比于欧洲西部和北

美等地较为薄弱，目前的滑雪产业发展主要依靠人工造雪。研究显示，我国人工造雪潜力高值区主要分布在“横断山—秦岭—太行山—燕山”一线的西北部地区，整体呈现“西北多，东南少”的空间分布特征。综合考虑地形、积雪和气候等要素，我国滑雪旅游发展的自然适宜区主要集中在东北地区的长白山和大、小兴安岭地区，西北地区的天山、阿尔泰山、祁连山等地，以及华北地区的燕山、太行山、吕梁山等地，因此应将这些地区作为重点发展区域[13-15]。② 气候变化已经成为滑雪产业发展面临的最大挑战。在全球气候变暖背景下，我国滑雪场未来可用的自然降雪量下降、人工造雪窗口期缩小，滑雪场发展的自然适宜度降低。到21世纪中叶，滑雪场发展的自然适宜度只有在RCP2.6①情景下呈现先下降后上升趋势，在RCP4.5和RCP8.5情景下则持续降低，并且滑雪旅游发展的自然适宜区逐渐向高纬度、高海拔地区转移[15]。为此，我国在大力发展滑雪旅游的同时，应充分考虑气候风险，构建适应气候变化的滑雪旅游新发展格局，以促进我国滑雪旅游可持续发展。

（2）聚焦贫困山区乡村振兴战略和生态文明建设，给出了冰雪产业发展建议。我国冰雪资源富集区主要位于高纬度、高海拔山区，也是贫困度发生度较高的地区。中国原832个贫困县（现均已脱贫）中，位于冰川资源富集区和稳定积雪区的占比分别为15.0%和26.4%。随着我国脱贫攻坚战取得了全面胜利，山区的交通、通信和基础设施得到改善，丰富的冰雪资源为巩固山区脱贫攻坚成果、发展冰雪经济提供了基础。研究组对此开展了系统研究。① 综合考虑冰雪旅游发展的自然因素和社会经济因素，研究了原14个集中连片特困区冰雪产业发展的适宜性。结果表明，适宜发展冰川旅游的乡村振兴重点区，主要位于除羌塘高原外的西藏全境、四川省藏区和新疆南疆三地州等高海拔地区；适宜发展滑雪旅游的乡村振兴重点区，主要位于燕山—太行山区、吕梁山区东北部、六盘山区西部、大兴安岭南麓山区、大别山区北部等低海拔山区。冰雪旅游将成为这些脱贫成果尚不稳固的山区经济发展的重要激活因子，对于防止返贫、推进乡村全面振兴具有较大的发展潜力[13]。② 考虑冰雪旅游富集区同时也是生态环境较为脆弱的地区，建议在发展冰雪旅游的同时，应注重生态环境保护，要坚持生态优先、绿色低碳理念，注重与科教、传统文化相融合，坚持高质量发展和环境保护并举。一方面，政府部门应加强主导作用，整合优势资源，制定相关政策，促进山地、积雪资源的合理开发和利用，切实将资源优势转化为产业优势；同时，树立“地铁式经济”理念，以点带线、以线带面，助力山区可持续发展。另一方面，滑雪产业利益相关者应全面考虑自然资源潜力、致灾可能性和气候变化风险，根据实际情况进行短期和长期规划，避免资源浪费。此外，相关部门应为旅游区脱贫人口提供就业培训，提高旅游服务质量，确保山区高质量发展，实现“物质”和“知识”上双脱贫的目标。

3 未来需求与展望

伴随着北京冬奥会的顺利举办，以及武大靖、苏翊鸣、谷爱凌等运动员相继摘取奖牌，冰雪运动已成为各大社交媒体炙手可热的讨论话题，大小雪场都变得异常火热。此次盛会已向全国普及了冰雪运动和冰雪旅游，极大地激发了人民群众参与的热情，冰雪产业不再是东北地区的“专属品”，已经形成了“三足鼎立、两带崛起、全面开花”的新格局。除了拥有天然积雪资源的东北地区、京津冀和新疆，以西藏、青

① RCP（Representive Concentration Pathways，典型浓度路径），是联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）采样的气候情景，集中反映人口、经济增长、能源结构和技术革新对温室气体排放的影响。用单位面积的辐射强迫表示未来100年温室气体稳定浓度的情景；通常使用4种情景，即RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5——辐射强迫的强度依次增强。

海为代表的青藏高原冰雪观光旅游带和以川贵鄂为代表的中西部冰雪休闲旅游带正在崛起；同时，山清水秀和温暖的南方地区也在打破时空限制，发展冰雪经济[13,16]。然而，我国冰雪产业仍处于起步阶段，虽然取得了一定进展，但核心技术的掌握仍需要时间消化吸收；目前，我国滑雪产业存在区域同质化严重、产业链不完善、产业间融合度低、服务保障基础设施不完善等问题[13,14]；此外，冰雪物理研究、雪场/滑冰馆、运动员等竞技体育的各个环节，未能有效贯通，未能形成竞技运动的全链条保障体系。

因此，研究团队将持续加强包括面向应用的冰冻圈基础科学、冰雪旅游在内的全国冰雪产业发展研究，因地制宜，宜冰则冰、宜雪则雪，以实现冰雪产业的可持续发展和绿色低碳路径[17]。进一步开展不同雪上项目冰雪物理基础研究，特别是：不同温度、湿度和压力（包括风速）等组合条件下雪粒的形成，粒径、密度、水分和硬度等的变化，雪层内部黏聚力和表面摩擦特性，以及风雪流和雪雾的影响；开启应用冰学的自主技术研发，加强滑冰场建设和维护中的有关冰物理参数研究和成冰技术研发；启动不同天气/环境状态下冰气交换物理特性对冰/雪面力学特性的影响研究，进而研究冰面状态和冰刀之间、雪面黏滞特性与雪板之间力学反馈。最终，能为冰雪运动竞技场地、运动员提供“一对一”的专属科技服务，尽快达到以挪威、德国、瑞士为代表的冰雪产业科技支撑水平，帮助我国运动员在高山滑雪、冰球和冰壶等项目上获得突破。

参考文献

1 秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. 冰冻圈科学体系的建立及其意义. 中国科学院院刊, 2020, 35(4): 394-406.

Qin D H, Yao T D, Ding Y J, et al. Establishment and significance of the scientific system of cryospheric science. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(4): 394-406. (in Chinese)

2 任贾文. 冰冻圈物理研究的新视野. 中国科学院院刊, 2020, 35(4): 450-455.

Ren J W. New perspective of research on cryospheric physics. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(4): 450-455. (in Chinese)

3 秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. 面向可持续发展的冰冻圈科学. 冰川冻土, 2020, 42(1): 1-10.

Qin D H, Yao T D, Ding Y J, et al. The cryospheric science for sustainable development. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 1-10. (in Chinese)

4 施雅风, 谢自楚, 张祥松, 等. 二十五年来中国冰川学的回顾与展望. 地理学报, 1985, 40(4): 367-376.

Shi Y F, Xie Z C, Zhang X S, et al. Twenty five years of glaciology in China: Retrospect and prospect. Acta Geographica Sinica, 1985, 40(4): 367-376. (in Chinese)

5 效存德, 武炳义. 极地冰冻圈关键过程及其对气候的响应机理研究. 北京: 科学出版社, 2019.

Xiao C D, Wu B Y. The Key Process of Polar Cryosphereand Its Influence on Climate. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)

6 Ding Y J, Zhang S Q, Zhao L, et al. Global warming weakening the inherent stability of glaciers and permafrost. Science Bulletin, 2019, 64(4): 245-253.

7 丁永建, 效存德. 冰冻圈变化及其影响研究：综合卷. 北京: 科学出版社, 2019.

Ding Y J, Xiao C D. Cryosphere Change and Its Influence Comprehensive Volume. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)

8 毕研群, 王飞腾, 韩海东, 等. 竞技型滑雪场赛道雪质及其气候变化风险评价——以河北省万龙滑雪场为例. 冰川冻土, 2019, 41(3): 709-718.

Bi Y Q, Wang F T, Han H D, et al. Snow quality of the track and climate change risk assessment of competition-type skiing grounds in China: A case study of Wanlong Ski Resort in Hebei Province. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(3): 709-718. (in Chinese)

9 肖王星, 效存德, 郭晓寅, 等. 北京-张家口地区冬春季积雪特征分析. 冰川冻土, 2016, 38(3): 584-595.

Xiao W X, Xiao C D, Guo X Y, et al. Winter and spring

snow cover features in Beijing-Zhangjiakou Region. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 584-595. (in Chinese)

10 Wang X, Qin D H, Ren J W, et al. Numerical estimation of thermal insulation performance of different coverage schemes at three places for snow storage. Advances in Climate Change Research, 2021, 12(6): 903-912.

11 杨淑萍, 韩海东, 王飞腾, 等. 河北省张家口市崇礼区储雪试验的先期评估. 冰川冻土, 2021, 43(4): 1253-1266.
Yang S P, Han H D, Wang F T, et al. Preliminary evaluation of snow storage in Chongli District, Zhangjiakou City, Hebei Province. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(4): 1253-1266. (in Chinese)

12 朱志强, 王飞, 王东海, 等. 2022年北京冬奥会造雪关键问题研究. 体育科学, 2020, 40(10): 31-40.
Zhu Z Q, Wang F, Wang D H, et al. Research on the key problems of snow making in Beijing 2022 Winter Olympic Games. China Sport Science, 2020, 40(10): 31-40. (in Chinese)

13 An H M, Xiao C D, Tong Y, et al. Ice-and-snow tourism and its sustainable development in China: A new perspective of poverty alleviation. Advances in Climate Change Research, 2021, 12(6): 881-893.

14 An H M, Xiao C D, Ding M H. The spatial pattern of ski areas and its driving factors in China: A strategy for healthy development of the ski industry. Sustainability, 2019, 11(11): 3138.

15 Deng J, Che T, Jiang T, et al. Suitability projection for Chinese ski areas under future natural and socioeconomic scenarios. Advances in Climate Change Research, 2021, 12(2): 224-239.

16 王世金, 徐新武, 窦文康, 等. 中国冰冻圈文化服务专题区划研究. 地理学报, 2022, 77(1): 16-34.
Wang S J, Xu X W, Dou W K, et al. Special regionalization of cryosphere culture service in China. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(1): 16-34. (in Chinese)

17 效存德, 苏勃, 王晓明, 等. 冰冻圈功能及其服务衰退的级联风险. 科学通报, 2019, 64(19): 1975-1984.
Xiao C D, Su B, Wang X M, et al. Cascading risks to the deterioration in cryospheric functions and services. Science Bulletin, 2019, 64(19), DOI: 10.1360/N972018-01314. (in Chinese)

Serving Beijing 2022 Olympic Winter Games and Developing Ice and Snow Industry: Application and Extension of Cryospheric Science

QIN Dahe[1] XIAO Cunde[1,2*] DING Minghu[3] WANG Feiteng[1] ZHU Zhiqiang[4] YIN Shuiqing[2] REN Jiawen[1]
（1 State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
3 Institute of Global Change and Polar Research, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;
4 Harbin Sport University, Harbin 150006, China）

Abstract Cryospheric Science, as an emerging interdisciplinary research field combining natural science and humanity, aims to understand nature’s law, serve human society and promote sustainable development. In recent years, by deepening the understanding of the cryosphere elements and the whole sphere, and by expanding the application research of cryospheric science, the Chinese community of cryospheric science has developed by leaps and bounds and realized the crossover from the traditional basic research to serving the major national needs, which marks the increasing maturity of the discipline. The Beijing 2022 Olympic Winter Games is a major landmark event at an important historical time in China. The special need of using snow and ice as the sports interface has led China’s cryosphere scientific team to focus on tackling key technical links of icy snow physics since 2016, and promoted the development of China’s cryosphere scientific application

*Corresponding author

research in the past five years. In view of the key technology of snow service for the Beijing 2022 Olympic Winter Games and the national needs of ice and snow economic development, a research team was formed by the State Key Laboratory of Cryospheric Science, in cooperation with scientific institutions (such as Beijing Normal University, Chinese Academy of Meteorological Sciences, and Harbin Sport University) and first-class enterprises in the domestic ice and snow industry (such as Yabuli Sports Training Base, National Alpine Skiing Centre, and Genting Snow Park). The team has solved many technical problems, including snow making, icy snow track making, snow quality prediction and snow storage. The team studied the impact of climate change on China's ski tourism and how ice and snow tourism can help with the sustainable development of mountainous regions economy. It also trained the first batch of graduate students and core technicians of ski resorts in China. This paper summarizes the key snow-making technology of the Beijing 2022 Olympic Winter Games, and projects the development path of China's ice and snow industry. It expounds the application and expansion of cryospheric science from the perspective of strategic thinking, knowledge building and practical innovation, and puts forward relevant thoughts and suggestions.

Keywords cryospheric science, Beijing 2022 Olympic Winter Games, snow service and guarantee technology, ice and snow industry, cryospheric service



秦大河 中国科学院院士，发展中国家科学院院士。主要从事冰冻圈科学与可持续发展研究。现任国家自然科学基金重大项目“中国冰冻圈服务功能形成过程及其综合区划研究”首席科学家和国家自然科学基金创新研究群体“冰冻圈与全球变化”项目负责人。E-mail: qdh@cma.gov.cn

QIN Dahe Academician of Chinese Academy of Sciences (CAS) , and Fellow of the World Academy of Sciences for the advancement of science in developing countries (TWAS). Dr. Qin has long been engaged in the research on cryosphere science and sustainable development. He is now the Chief Scientist of the Key Project "Study on the Formation Process and Comprehensive Regionalization of China's Cryosphere Service Function" sponsored by National Natural Science Foundation of China, and the PI of Innovation Research Group "Cryosphere and Global Change" also sponsored by National Natural Science Foundation of China. E-mail: qdh@cma.gov.cn



效存德 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室主任、教授、博士生导师。主要从事冰冻圈与全球变化、冰冻圈功能及其服务研究。曾任国际冰冻圈科学学会（IACS）副主席，现任世界气象组织（WMO）极地与高山观测、研究和服务指导委员会（EC-PHORS）委员、中国冰冻圈科学学会（筹）秘书长、中国科学探险协会副主席、IPCC AR6 第一工作组第九章首席作者（CLA）等，以及*International Journal of Disaster Risk Science*和*Advances in Climate Change Research*等杂志编委。主持国家重点研发计划、国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金重大项目课题多项。发表论文250余篇。E-mail: cdxiao@bnu.edu.cn; cdxiao@lzb.ac.cn

XIAO Cunde Professor and Director of State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology (ESPRE), Beijing Normal University (BNU). Dr. Xiao's research interests focus on cryospheric and global changes, cryosphere functions and their services. He used to serve as Vice-President of International Association of Cryospheric Science (IACS), and now is a member of the World Meteorological Organization (WMO) Expert Committee of Polar and High Mountain Observation, Research and Services (EC-PHORS), the Coordinate Leading Author (CLA) of Working Group One (WG1) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Sixth Assessment Report (AR6), the Secretary-General of China Society of Cryospheric Science, and the editorial board of many journals such as *International Journal of Disaster Risk Science* and *Advances in Climate Change Research*. He is also the Principal Investigator (PI) of the National Key R&D Program of China, the Assistant PI of the National Fundamental Research Development Plan Project of China, and the National Natural Science Foundation of China. He has completed and published more than 250 papers.
E-mail: cdxiao@bnu.edu.cn; cdxiao@lzb.ac.cn

■责任编辑：岳凌生